

山区公路高边坡生态防护新技术及稳定性研究

李 辉

宾川县地方公路管理段 云南大理 671600

摘 要：随着中国山区公路发展，高边坡失稳、生态环境破坏问题愈加突出，寻求安全、环保的技术方案成为解决工程难题的关键。本文基于山区公路的需求，系统总结了三维植被网、ESF 高性能生态修复技术等先进环保技术方法，对其构造形式和护坡机理进行分析，并研究极限平衡法、数值模拟技术、智能监测技术运用于稳定性评价。目前生态防护技术已经从单一工程措施演进为“生态 + 工程协同”的形式，仍然存在复杂地质条件适应性、长期稳定性维持的不足。提出可为山区公路的高边坡生态防护工程建设服务，促进绿色交通工程及生态修复相结合的发展理念。

关键词：山区公路；高边坡；生态防护技术；稳定性评价；三维植被网；ESF 生态修复技术

引言：

我国山区面积占国土总面积的 69%，“交通强国”战略更推动了山区公路不断向纵深挺进。2025 年，我国山区公路一半以上涉及到高陡边坡。从有关统计看，我国现有山区公路的高边坡已有超 12 万公里，其中超 30% 为高度危险类型（指坡度值大于 1 : 0.5）。传统的工程保护方式主要采用浆砌片石、喷锚支护等刚性防护措施，这些方法虽然能对滑坡起到短期防护作用，但存在三个方面不足：一是损害生态环境，在一定程度上会减少覆盖在岩石上植被的 40% ~ 60%，致使水土流失更加严重；二是刚性支护无法适应岩体的变化，因此在后期会破裂而出现渗漏，从而降低边坡的安全稳定性；三是长期经济效益较差，后期的维修造价会占据总造价的三分之二甚至更多。因此需要寻求新的适用于山区公路高边坡生态防护技术。近年来，我国在原有三维植被网探索的基础上，逐渐发展了 ESF 生态修复技术并应用于实际工程，形成“防护—修复—稳定”技术体系。因此，岩质边坡健康监测系统（采用中国水利水电科学研究院岩质高边坡分析系统支持）结合数字模拟与现场监测相结合应用在西南山区公路工程已得到实际验证。江西省出台了《公路工程裸露边坡生态防护施工技术规范》等相关政策法规将得到实施，公路边坡的侧重点逐渐向“生态修复 + 稳定性提升”转变。

1 传统生态防护技术概述

传统的生态防护技术对早期山区公路建设带来的水土保持做出了基本贡献，但是随着工程复杂性的提升，这些技

术上的局限性也愈发显现出来。人工植草技术以人工的形式铺设植被，这种技术比较简单经济，适用于坡度小于 1:1.5 土质坡体，但是对于石面、陡峭等类型的坡体显得乏力，并且只有少于 50% 的植物存活率。铺草皮技术在面对坡体时可大面积快速铺盖，起始防护效果较好，但是其草皮的根部太浅，对斜坡固定的程度不高，并且一旦遇到雨季容易出现滑动，且外来草种可能引发生态入侵风险。通过液压喷播技术以高压喷枪在坡体上喷射含草种、肥料等的黏合物，可以实现一定程度的高效率，但其基材抗冲刷性较弱，在大于 1:1.25 的坡体容易脱落，喷射时如果厚度不均也会导致植物的疏密程度不统一。

这些传统的防护技术都有 3 个共同缺陷：首先这些技术仅仅考虑植被覆盖忽视了结构稳定性，因而无法解决山地复杂地形的适应性问题；其次生态修复周期长，一般需要至少两个到三个生长周期才能见效，在过程中存在坡面失稳风险；最后，极端环境适应性差，一旦降水量超过 1200mm 或者昼夜温差超过 15° C 时，植被存活率会下降 30%—40%。山区公路建设随着向高海拔和陡峭地段的扩展，现有技术难以同时满足安全、生态、经济的工程需求。

2 山区公路高边坡生态防护新技术

2.1 三维植被网防护技术

三维植被网防护技术是在仿生学的理论基础上建立的具有多维度植被生长空间的技术，主要依靠一系列高分子聚合物构成的三维聚合物网垫为核心，在此基础上包含两层双向拉伸的平网提供基础锚固，中间部分是由轻质材质含有

大量气泡材料填充而成的 10 ~ 15mm 的三维孔隙结构，最外层是网格状排列的具有一定耐久性的网布，能有效保护植被表层土壤且便于光线的照射，其在空气中的孔隙率高于 85%，有利于植物根系生长。防滑功能方面，主要靠网垫物理坡面径流速度降低 60% ~ 70%，即降低了雨水的冲击力和侵蚀力，且能拦截约 80% 的坡面松散颗粒；植物根系穿过网眼后，与土壤结合在一起形成“根-网-土”复合锚固系统，如狗牙根等草本植物会在网眼内部形成直径 5 ~ 10cm 的根团，进而提高表层土壤 30% ~ 50% 的黏附力；而灌木主根更能深深扎入岩质裂隙内形成深 1.5 ~ 2m 的锚杆效应，加大自身的稳固性。

施工工艺采用“坡面整理—网垫铺设—锚杆固定—基材喷播”的不间断操作步骤进行施工。对需要整治的岩质边坡通过清理后按 2×2 的网格距离，用 Φ12mm 螺纹钢锚钉采用梅花形布置的原则，确保网格覆盖物能牢固、严密地贴在坡面，角度偏移不超过 5°。优点在于大面积运用时可减少开挖量 30% 左右；网垫的弹塑性结构可减缓落石冲击力，结合植物根系的动态强化，总体边坡的安全系数可提高 0.2 ~ 0.3，且本技术的创新点突破了单纯工程防护的局限性，使植物、网体相互作用，使边坡治理从“被动拦截”到“主动固坡”的新功能，特别适用于风化较严重岩质边坡以及容易发生地质灾害道路的生态环境修复。

2.2 基材优化与植物配置技术

生物活性改良技术基材优化法主要依靠对生物基改良剂的应用以促进防护功能与生态性能的协同提升，其中诸如使用甲壳素衍生物类作为生物基的改良剂，基于其分子中的氨基、羟基等基团能使土壤颗粒形成直径 0.5—2mm 的水稳性团聚体，有效增强了基材的渗透系数，并可以抑制微生物的繁殖，避免了坡面霉变。而使用木质素磺酸盐类保水剂具有三维网格式分子结构，使其吸水量达本身质量 300 ~ 500 倍，在干早期以缓慢释水，可维持根系相对湿度稳定在 15% ~ 20%，保质期可达植物整个生长周期，并且无化学残留产生。向基材添加纳米级膨胀土会促进基材黏聚力的进一步改善，并在掺量比例不高于 5% 的情况下能有效提高基材的抗剪强度 40% ~ 60%，同时保持良好的透气性，有利于植物根部氧吸收。

以“生态位互补”原则搭配不同层级的防护群落结构，在防护群落结构的设计上，同样纳入了植物配置技术。先锋物种主要考虑到快速覆盖并固坡特性，如狗牙根是生长最为迅速的物种，能够在 45 ~ 60 天形成初始植被覆盖，并且其根系能够承受的最大拉伸力量能够达到 15 ~ 20MPa，能有效约束表层土体位移。本地植物主要考虑长期稳定性与生态功能，如美丽胡枝子属于豆科灌木类植物，利用根瘤菌固氮作用增加土壤中养分含量，同时该植物的主根深度可达 1.2m ~ 1.8m，与先锋草种形成深浅搭配的根系网络。

不同立地条件下的植物组合策略呈现显著差异：

表 1 不同立地条件下的植物组合表

| 立地类型 | 先锋物种组合 | 乡土物种搭配 | 配置比例（草：灌：藤） | 生态功能侧重 |
|-----------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 岩质边坡（60° ~ 75°） | 高羊茅 + 紫花苜蓿 | 火棘 + 葛藤 | 6:3:1 | 快速覆盖，固坡为主 |
| 土质边坡（45° ~ 60°） | 狗牙根 + 白三叶 | 美丽胡枝子 + 野蔷薇 | 5:4:1 | 水土保持，肥力提升 |
| 土石混合边坡 | 黑麦草 + 沙打旺 | 马棘 + 爬山虎 | 4:4:2 | 抗侵蚀，生物多样性提升 |
| 高寒山区边坡 | 披碱草 + 早熟禾 | 金露梅 + 高山柳 | 7:2:1 | 耐寒耐旱，群落稳定性 |

3 生态防护与稳定性提升的工程协同应用

3.1 工程措施与生态防护的协同设计

采用“地质情况 + 结构安全 + 生态修复”三维决策模型指导生态及工程联合设计工作，依照“先固坡后植生”原则建立递进防护系统。采用主动防护网与生态基质喷播技术相结合的方式建设表面物理阻隔设施，菱形网格结构既能阻拦石块飞落，亦能为植物创造生根养分的环境。设计流程采用四阶段递进模式：①以无人机航测与钻孔 CT 扫描技术精确识别地貌及不稳定区域；②在设定边坡高度的基础上确定

锚杆长度与密度，确保主动防护网安全系数大于 1.5；③参照土壤酸碱性及年降雨量调整基础材料配比；④参数匹配阶段通过有限元耦合分析，使生态基材喷射厚度与网体张力形成动态平衡。这种复合体系走出传统偏重工程轻生态的设计局限，在云南省某公路 K23+150 边坡成功试点，相比于单一的混凝土护壁，减少碳排放 42%，边坡稳定可靠性提升 1.35。

3.2 施工工艺优化与质量控制

“精准喷射、动态控制”贯穿于整个工程施工建设过程

中的施工工艺体系。泵送式湿喷机有效增加基层喷涂的效果及均匀性,其双螺旋搅拌器精确把控干料混合的时间,即保证了低碳凝胶材料与骨料接触的均匀性。此外,采用高压喷枪配套的万向节调节装置可以确保 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的陡坡斜面以最佳的喷射角度,同时结合激光测厚仪控制基底厚薄范围偏差 $\pm 5\%$ 。采用生态棒预制技术对传统的喷播方式进行改良,即将灌木种子和缓释肥装在密封的无纺布筒内,按 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的面积布置在坡面基基层中种植,解决了陡坡面上种子分布不均的问题,灌木存活率提高 28%。对质量控制的关键点进行如基材初凝时间通过调整生物酶制剂掺量实现动态调节;采取“分段跳槽”的模式进行喷射作业,避免因坡面长时间暴露导致部分区域失去稳定性;在养护期间覆以遮阳网,并在表面应用滴灌系统,保持基底水分含量在 $18\% \sim 22\%$ 。这些工艺创新使施工期边坡位移量控制在 5mm 以内,比起传统技术方法减少了 35% 的返工率。

结束语:山区公路高边坡生态防护新技术是平衡工程建设与生态保护的关键纽带,其发展水平直接关系到山区交通网络的可持续性与生态系统的完整性。三维植被网、ESF 高性能生态修复等技术的创新应用,突破了传统工程防护的生态瓶颈,通过“生态+工程协同”机制实现了边坡安全稳定与生态功能恢复的双重目标。这种协同模式的核心在于将植被根系固坡效应与工程结构防护有机融合,既发挥了植物的长期生态修复功能,又保障了边坡的短期稳定性需求,为山区公路建设提供了绿色技术路径。

参考文献:

- [1] 夏磊,王术桁,唐文广. 植生基材边坡生态防护技术在工程中的应用及进展 [J]. 四川建材, 2025, 51(09): 102-104+127.
- [2] 张旭,岑移芬. 灾毁高陡岩质边坡预应力框格防护与生态复绿施工技术研究 [J]. 江西建材, 2025, (08): 358-360.
- [3] 任桂镇,童星,郭明凡,等. 高陡硬质边坡加筋麦克垫抗侵蚀生态防护技术研究 [J]. 电力勘测设计, 2025, (06): 65-69.
- [4] 余朝阳. 川西高原高边坡稳定性评价与生态防护技术研究进展 [J]. 路基工程, 2025, (05): 29-36.
- [5] 李舒阳,范森勇,李金城,等. 植被混凝土在边坡生态防护新技术中的应用现状研究 [J]. 市政技术, 2025, 43(02): 19-25+62.
- [6] 樊剑峰. 植被混凝土护坡技术在高陡岩石边坡生态防护中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(06): 85-87.
- [7] 张兆冬. 高路堑边坡喷播藤本植物生态防护施工技术 [J]. 成都航空职业技术学院学报, 2024, 40(01): 63-66.
- [8] 高山,付涛,周成,等. 广西贺巴高速来都段石漠化边坡植被恢复和生态防护技术的应用分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9251-9259.
- [9] 郭涛. 山区公路边坡生态防护技术研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(20): 233-234.
- [10] 章林平. CF 网植草喷播生态防护技术在山区公路边坡防护中的应用 [J]. 江西建材, 2021, (08): 136-137+139.

作者简介:李辉(1978.08-),男,汉族,本科,云南省宾川县,公路养护工程师,研究专业方向:交通工程/公路工程。